

Hybride Modellierung zur Optimierung der Strömungsbedingungen und des Geschiebetriebs beim Flusskraftwerk Lavey

Jean-Louis Boillat, Martin Bieri, Michael Müller und Anton J. Schleiss

Zusammenfassung

Wie viele Flusskraftwerke ist auch das Kraftwerk Lavey an der Rhone (Schweiz) von einer steten Verlandung seines Stauraums betroffen, sodass regelmässig Spülungen durchgeführt werden müssen. Im Rahmen des Ausbauvorhabens *Lavey+* sollen die Abflüsse der Rhone mittels einer zusätzlichen Fassung und einem Parallelstollen optimal genutzt werden. In hydraulischen Modellversuchen, ergänzt mit numerischen Simulationen, wurde ein Konzept zur nachhaltigen Sedimentbewirtschaftung erarbeitet. Die optimierte Stauraumkonfiguration verhindert den Geschiebetransport in den Bereich vor den Wasserfassungen weitgehend und gewährleistet einen effizienten Austrag der Sedimente während den Spülungen. Des Weiteren wurden die Anströmungsbedingungen der neuen und alten Wasserfassung sowie das Abführen von Hochwasser durch die bestehenden Wehrfelder analysiert und optimiert. Der hybride Lösungsansatz trägt zu einer schnellen und fundierten Problemlösung bei. Angemessene numerische Hilfsmittel vor und während der Versuchsphasen sowie aktuelle Messverfahren beschleunigen die Projektabwicklung und verhindern überflüssige kostenintensive Versuche.

1 Einleitung

Das Flusskraftwerk Lavey turbinert Wasser der Rhone, das in der Nähe von Evionnaz im Kanton Wallis (Schweiz) gefasst wird. Die 1949 in Betrieb genommene Anlage besteht aus einem beweglichen Wehr, das den Wasserstand vor der rechtsufrig gelegenen Wasserfassung kontrolliert (Abb. 1). Drei Wehrfelder mit je zwei Hubschützen gewähren eine sichere Hochwasserentlastung.

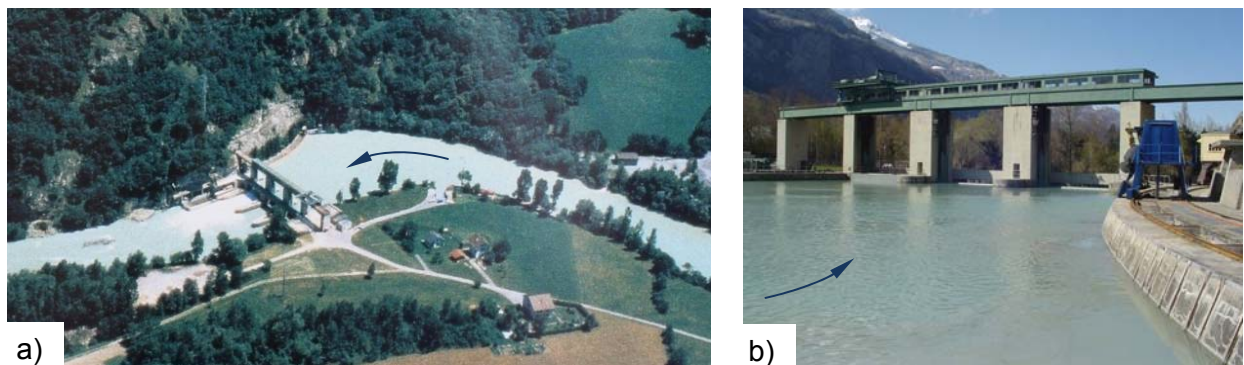


Abb. 1 Flusskraftwerk Lavey: Luftaufnahme (a) und Sicht auf Wasserfassung und Wehr (b)

Während des Hochwassers von Oktober 2000 (Spitzenabfluss $1270 \text{ m}^3/\text{s}$) konnten Ausuferungen in Lavey nur knapp verhindert werden. Die Vermessung des Stauraums zeigte beträchtliche Geschiebeablagerungen, die zu Kapazitätseinbussen führten. Darauf beauftragte die Betreiberin des Kraftwerks, die Stadt Lausanne, die Ingenieurgemeinschaft bestehend aus *Stucky SA*, *Hydrocosmos SA* und *Bonnard & Gardel SA* mit der Ausarbeitung von Interventionsmassnahmen zur Entfernung der Sedimentdepots. Um die vorgeschlagenen Varianten hydraulisch und sedimentologisch zu evaluieren, wurde am *Laboratoire de*

Constructions Hydrauliques (LCH) der *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL) eine Studie mit einem physikalischen Modell in Auftrag gegeben.

Das Hauptaugenmerk der Studie richtet sich auf eine nachhaltige Sedimentbewirtschaftung des Stauraums. Daneben sollen die Anströmungsbedingungen der Wasserefassung sowie die Betriebsvorschriften des Wehrs im Hochwasserfall untersucht werden. Die Studie des Flusskraftwerks Lavey basiert auf einem hybriden Lösungsansatz, wobei sich numerische Simulationen, Modellversuche und Beobachtungen am Prototyp ergänzen (Abb. 2).

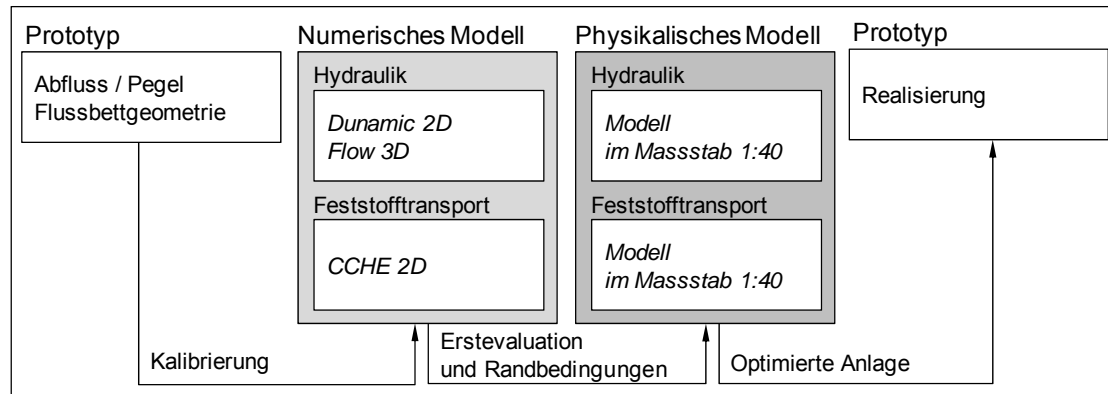


Abb. 2 Hybrider Lösungsansatz für die Studie des Flusskraftwerks Lavey

In einer Vorstudie wurden Strömungsfelder und der Geschiebetrieb mit zweidimensionalen Berechnungsprogrammen (*Dunamic 2D*, *CCHE 2D*) simuliert [3]. Im physikalischen Modell (Massstab 1:40) wurde zuerst die heutige Stauraumkonfiguration nachgebildet und geeicht. Die gemessenen Auflandungen entsprachen jenen in situ. Auch die Spülung mit teilweise Austrag der Ablagerungen verlief realitätsnah [6]. Die erste Versuchsreihe erlaubte so die Bestimmung des Referenzzustandes, welcher den Ausbauvarianten gegenübergestellt wurde.

Um die Strömungsbedingungen für verschiedene Szenarien zu simulieren wurde ein numerisches 3D-Modell (*FLOW3D*[®]) verwendet. Die komplexen Randbedingungen des stark gekrümmten Flussabschnitts rechtfertigten den dreidimensionalen Ansatz. Die Resultate führten zu geometrischen Anpassungen der geplanten Fassung und der vorgesetzten Leitmauer.

Der vorliegende Beitrag beschreibt den hybriden Ansatz und vergleicht den Ist-Zustand des Flusskraftwerks Lavey mit dem Ausbauprojekt *Lavey+*.

2 Das Flusskraftwerk Lavey – heute und morgen

2.1 Bestehende Anlage

Unterhalb von Evionnaz wird die Rhone durch ein Wehr gestaut um Wasser für das Flusskraftwerk Lavey (3 x 31 MW) zu fassen. Die drei Wehrfelder von je 13 m Breite sind mit zwei Hubschützen ausgestattet und erlauben somit einen flexiblen Betrieb im Normal- sowie Hochlastfall (Abb. 3a). Das Wehrfundament befindet sich auf einer Höhe von 435 m ü.M.

Die bestehende Wasserefassung am rechten Flusssufer setzt sich aus zwei Einlaufftrompeten zusammen, die in je zwei Portale von 14 m Breite unterteilt sind. Eine Schwelle auf 438 m ü.M. und die Oberkante der Einlauföffnungen auf 443.5 m ü.M. ergeben eine Einlaufhöhe von 5.5 m.

Der Rechen mit automatischen Reinigungsmaschinen verhindert das Eindringen von Geschwemmsel.

Im Normalbetrieb wird der Wasserspiegel auf 446 m ü.M. gehalten, was die Entnahme des maximalen Turbinenabflusses von $250 \text{ m}^3/\text{s}$ erlaubt. Im Sommer wird der Wasserspiegel auf 445 m ü.M. abgesenkt, um ein erhöhtes Reststauvolumen im Hochlastfall zu gewährleisten. Bei Hochwasser (Abfluss der Rhone $\geq 600 \text{ m}^3/\text{s}$) wird der Betrieb aufgrund erhöhter Sedimentkonzentrationen eingestellt und der gesamte Abfluss wird durch die Wehranlage entlastet. Die Schützen können bis auf eine Unterkantenhöhe von 444.8 m ü.M. angehoben werden.

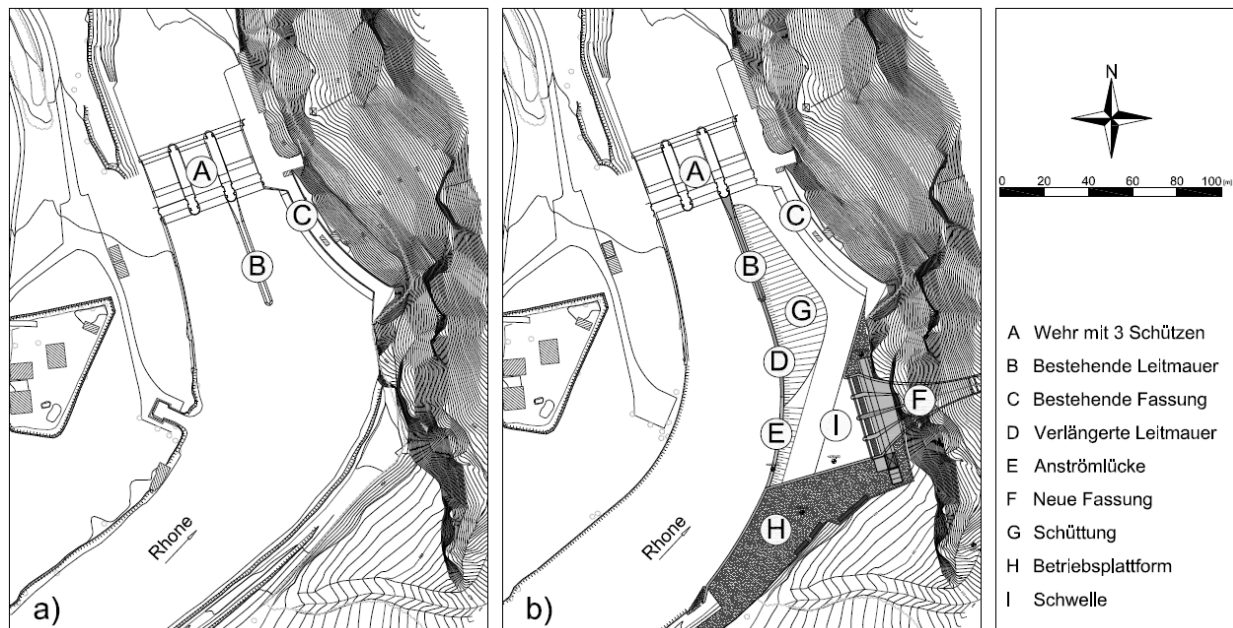


Abb. 3 Situation des Flusskraftwerks Lavey: Ist-Zustand (a) und Lavey+ (b)

2.2 Ausbau Lavey+

Mittels einer zusätzlichen Fassung und eines Parallelstollens einer Kapazität von $140 \text{ m}^3/\text{s}$ soll im Rahmen des Ausbauvorhabens Lavey+ (Abb. 3b) die konzessionierte Abflussmenge von $250 \text{ m}^3/\text{s}$ energetisch effizienter genutzt werden. Eine verlängerte Leitmauer soll den Sedimenteintrag in den Bereich vor den Fassungen minimieren und Ablagerungen auf die linke Flussseite beschränken. Der sich durch die Leitmauer zum Wehr hin verjüngende Flussabschnitt bewirkt bei Spülungen einen schnellen und effizienten Sedimentaustrag. Im Bereich hinter der Leitmauer gewährt ein Spülkanal den Austrag der abgelagerten Feinsedimente.

Die Oberkante der Leitmauer liegt auf 444 m ü.M., wobei eine Anströmlücke von 42 m Länge auf 443 m ü.M. die neue Fassung speist. Diese Wasserfassung kommt rund 37 m flussaufwärts der bestehenden Fassung rechtsufrig zu liegen. Breite und Höhe der vier Einlaufportale betragen 7.80 m respektive 4.5 m. Die Einlaufschwelle auf 439 m ü.M. ist als dreieckige Plattform zwischen der untersten Einlauföffnung und der vertikalen Mauer der Betriebsplattform ausgelegt.

3 Hydraulische und numerische Modellierung

3.1 Eigenschaften des hydraulischen Modells

Das physikalische Modell im Massstab 1:40 wird nach Froudeähnlichkeit betrieben. Es bildet die Rhone auf einer Länge von 500 m ab, 350 m ober- und 150 m unterwasserseitig des Wehrs (Abb. 4). Die Abflüsse werden mit elektromagnetischen Durchflussmessern kontrolliert und der Überlauf am Modellende erlaubt die entsprechende Pegel-Abfluss-Bedingung zu respektieren. Die Topographie und der Flussabschnitt (in seiner Form zur Bauzeit 1949) wurden mit Zementmörtel realisiert und die Bauwerke aus PVC gefertigt.

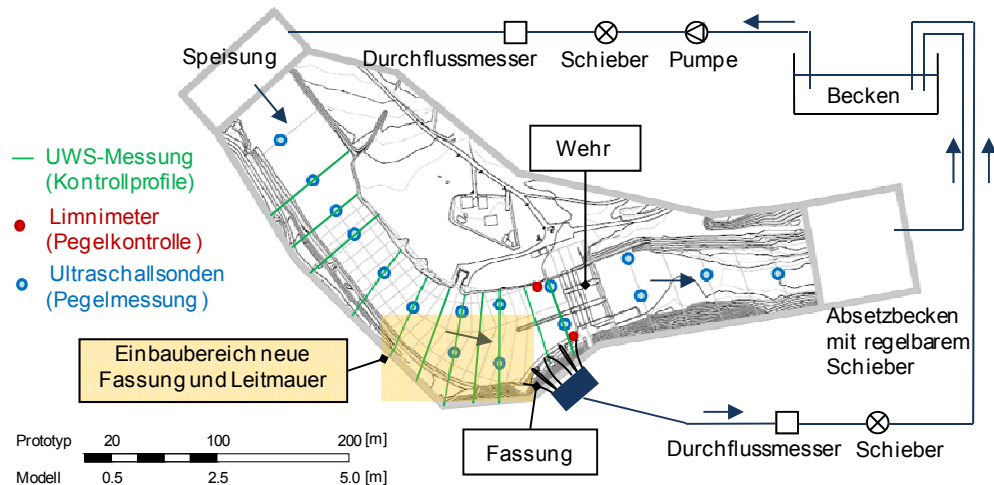


Abb. 4 Geometrie, Speisung und Instrumentierung des hydraulischen Modells (Ist-Zustand)

Die Versuche mit Sedimenteintrag wurden mit einem nicht kohesiven Sand mit einer der Realität entsprechenden Kornverteilung durchgeführt. Der Transport beginnt gemäss dem Shields-Kriterium. Am Modellende hält ein Auffangbecken die eingetragenen Sedimente zurück.

3.2 Messeinrichtung und Messparameter

Der Wasserstand wird an 16 relevanten Stellen mit geeichten Ultraschallsonden gemessen. Geschwindigkeitsmessungen mit Messflügel sowie UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) erlauben die Abflussverteilung zwischen den einzelnen Einlauföffnungen der Wasserfassungen und zwischen den drei Wehrfeldern zu bestimmen. Das Strömungsfeld wird mit Hilfe eines löslichen Farbindikators sowie an der Wasseroberfläche mit der LSPIV-Methode (Large Scale Particle Image Velocimetry) [1, 5] dokumentiert. Während der Versuche mit Geschiebetrieb werden die Ablagerungen mittels eines Mini-Echo-Sounders (UWS) [4] ohne Versuchsunterbruch gemessen.

3.3 Numerische Simulationen

Um die Fliessbedingungen und den Sedimenttransport im Vorfeld der hydraulischen Modellversuche zu simulieren, wurden von der Ingenieurgemeinschaft zweidimensionale Berechnungsprogramme eingesetzt.

Die Hydraulik der Rhone wurde von *HydroCosmos SA* mit dem selbst entwickelten Programm *Dunamic 2D* [3] untersucht, das die kompletten Saint-Venant-Gleichungen mit der Finite-Volumen-Methode löst. Dieses zweidimensionale Modell simuliert Abflusstiefen und Fliessgeschwindigkeiten für strömende wie auch schiessende Verhältnisse.

Der Einfluss der geplanten Kraftwerkserweiterung wurde für verschiedene Betriebszustände und Spülvorgänge sowie für Hochwasser mit Geschiebetrieb mit *CCHE 2D* [3] simuliert. Das FEM-Programm wurde vom *National Center for Computational and Engineering* der Universität Mississippi entwickelt und löst die Saint-Venant-Gleichungen gekoppelt mit Geschiebetrieb durch Sohlentransport oder/und Suspension.

Aufgrund der Komplexität der Strömungsbedingungen im gekrümmten und verbauten Flussabschnitt wurden ergänzend zum physikalischen Modell numerische Simulationen mit der Software *FLOW3D*[®] durchgeführt. Zuerst wurde der Ist-Zustand der Kraftwerksanlage mit ursprünglichem und verlandetem Stauraum untersucht und mit den Resultaten des physikalischen Modells verglichen. Dabei wurde die Maschengrösse im Bereich der Bauwerke (Wehr und Fassung) so gewählt, dass die Konvergenzkriterien trotz relativ kurzer Rechenzeiten erfüllt werden konnten [7]. Als Randbedingungen wurden im Betriebszustand der Beckenpegel (Volume flow rate), die Austrittsgeschwindigkeit unterhalb der Wasserefassungen (Specified pressure) und der Abfluss durch das Wehr (Volume flow rate) definiert. Bei Hochwasser wurden die ober- und unterwasserseitigen Wasserstände definiert.

4 Resultate

4.1 Kalibrierung und Validierung

4.1.1 Betrieb und Hochwasserabfuhrkapazität

Das Flusskraftwerk Lavey wurde zuerst in seinem heutigen Zustand hydraulisch, d.h. ohne Sedimentzugabe und mit fixer Sohle, im physikalischen und numerischen Modell untersucht. Bei vorgegebener Pegel-Abfluss-Bedingung wurden die Fliessgeschwindigkeiten am Eintritt der Wasserefassung gemessen und die Abflussverteilung zwischen den vier Einlauföffnungen ermittelt. Beide Modelle zeigen ähnliche Werte der Kapazität der beiden Einlauftrumpeten, wobei im physikalischen Modell die oberwasserseitigen Öffnungen jeweils stärker angeströmt werden (Abb. 5). Die Höchstgeschwindigkeiten am Rechen betragen 1.2 m/s. Die Verlandung des Stauraums und die damit verbundene Querschnittsverengung hat eine Erhöhung der Eintrittsgeschwindigkeit auf maximal 1.35 m/s zur Folge.

Im Normalbetrieb wird der Wasserspiegel auf 446 m ü.M. gehalten, wobei in unmittelbarer Nähe der Fassung ein leichtes Absenken der Wasseroberfläche zu beobachten ist. Die Oberflächenströmungen konnten mit der LSPIV-Methode ermittelt werden. Der Vergleich mit den oberflächennahen Strömungsfeldern in *FLOW3D*[®] zeigt eine gute Übereinstimmung der beiden Modelle.

Bei einem Abfluss der Rhone von 1270 m³/s (Hochwasser von 2000) ist der Kraftwerksbetrieb eingestellt und sämtliche drei Wehrfelder sind voll geöffnet. Die Vorberechnungen mit *Dunamic 2D* hatten gezeigt, dass das mittlere Feld den grössten Abfluss aufweist. Dieses Phänomen trat im physikalischen Modell noch ausgeprägter auf, da das Wehrfeld am linken Rhoneufer im Schutz der Flussbiegung und dasjenige am rechten Ufer hinter der Leitmauer suboptimal angeströmt werden (Abb. 6). Auch die Simulation mit *FLOW3D*[®] ergibt eine

heterogene Abflussverteilung. Die Differenzen beim Abfluss von bis zu 5 % zum hydraulischen Modell zeigen jedoch, dass selbst leistungsfähige 3D-Modelle nicht sämtliche Phänomene ausreichend abbilden können.

Eine weitere Erhöhung des Abflusses verringert den Einfluss der Leitmauer und führt zu einer homogenen Abflussverteilung, wobei der mittlere Durchlass nach wie vor am meisten abführt. Die Pegel am linken respektive rechten Flusssufer weisen aufgrund der Flussbiegung eine Differenz von 0.5 bis 0.7 m auf. Dies wurde sowohl im physikalischen, wie auch im numerischen Modell beobachtet.

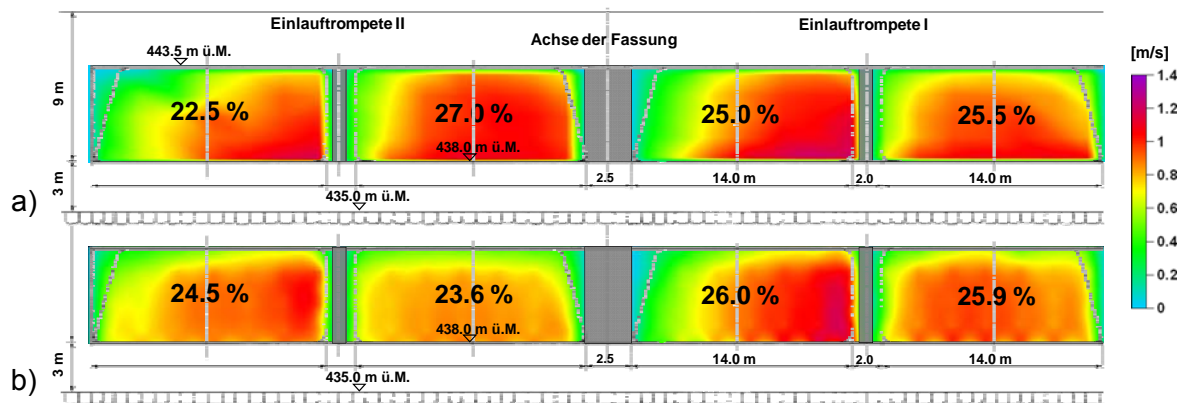


Abb. 5 Strömungsgeschwindigkeiten und Abflussverteilung am Einlauf der bestehenden Fassung, $Q_{\text{Rhône}} = Q_{\text{Fassung}} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, Pegel 446 m ü.M., Resultate der hydraulischen Modellierung (a) und der numerischen Simulation mit *FLOW3D*® (b)

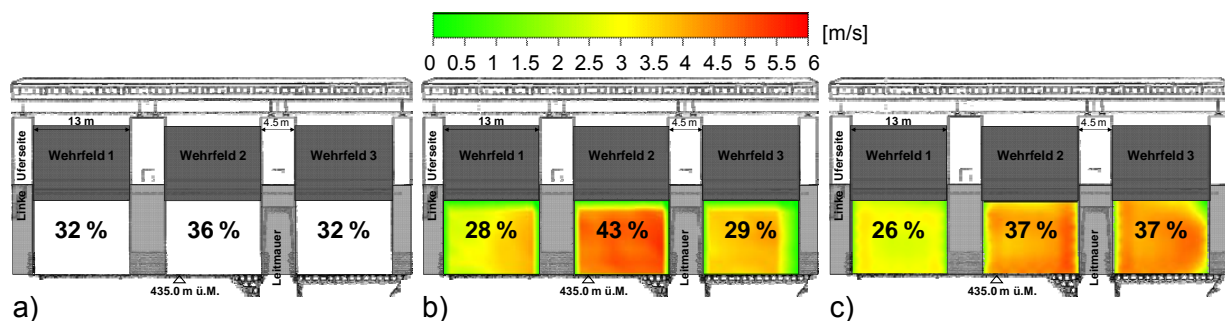


Abb. 6 Strömungsgeschwindigkeiten und Abflussverteilung durch die drei Wehrfelder, $Q_{\text{Rhône}} = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$ (HW 2000); Resultate der Simulation mit *Dynamic 2D* (a), der hydraulischen Modellierung (b) und der Simulation mit *FLOW3D*® (c)

Der Vergleich der Resultate zeigt, dass die Strömungsverhältnisse mit *FLOW3D*® bis auf einige lokale Phänomene verlässlich nachgebildet werden können. Das Programm wurde in der Folge für die Variantenstudie des Kraftwerksausbaus *Lavey+*, insbesondere beim Entwurf der neuen Fassung, benutzt, bevor diese Elemente im physikalischen Modell eingebaut wurden.

4.1.2 Sedimentbewirtschaftung

Zur Eichung des physikalischen Modells im Bezug auf die Sedimentations- und Spülproblematik wurden In-situ-Messungen berücksichtigt. Die im Modell durchgeführten Versuche erlaubten, den Referenzzustand vor der Spülung 2005 realitätsgetreu nachzubilden (Abb. 9, Abschnitt 4.2.3). Nach einer Auflandungsphase bei konstantem Abfluss wurden kleine Hochwassersequenzen mit entsprechender Sedimentzugabe simuliert. Mit Hilfe eines Mini-Echo-Sounder (UWS) konnte die Entwicklung der Sohlengeometrie bei laufendem Versuch

verfolgt werden. Die Auflandungsgeometrie zeichnet sich durch Ablagerungen auf der Innenseite der Flussbiegung und einer Rinne entlang der Kurvenaussenseite aus (Abb. 10b).

Die in der Vorstudie durchgeführten Simulationen mit *CCHE 2D* hatten eine Sohlengeometrie mit zwei Rinnen, eine rechts und eine in Richtung des mittleren Wehrfelds ergeben und unterscheiden sich somit erheblich von den Resultaten des physikalischen Modells. Die Auflandungen am linken Flusssufer sind jedoch in beiden Modellen vorhanden.

4.2 Modellversuche zum Kraftwerksausbau Lavey+

4.2.1 Betrieb

Die im Abschnitt 2.2 beschriebene Ausbauvariante soll zum einen die Auflandungsproblematik entschärfen und zum andern einen flexibleren Betrieb des ausgebauten Kraftwerks gewährleisten. Deshalb dürfen die geplanten Bauwerke, insbesondere die verlängerte Leitmauer und deren Anströmlücke, die guten Anströmbedingungen der existierenden Fassung nicht beeinträchtigen. Gleichzeitig minimiert ein ausgeglichenes Strömungsbild zur neuen Fassung die Energieverluste am Einlauf.

Die Versuche zeigten, dass die Geschwindigkeitsverteilung am Eintrittsquerschnitt sehr empfindlich auf geometrische Veränderungen der Anströmlücke (Länge, Höhe, Distanz zur Fassung) reagiert. Die Konfiguration von *Lavey+* gewährleistet zufriedenstellende Zuflussbedingungen für die neue Wasserfassung, deren vier Eintrittsöffnungen für beide Betriebswasserstände gleichmässig gespiesen werden (Abb. 7). Die maximal gemessenen Geschwindigkeiten am Rechen für einen turbinierten Abfluss von $75 \text{ m}^3/\text{s}$ lagen bei 0.6 m/s und für $140 \text{ m}^3/\text{s}$ bei 1.25 m/s .

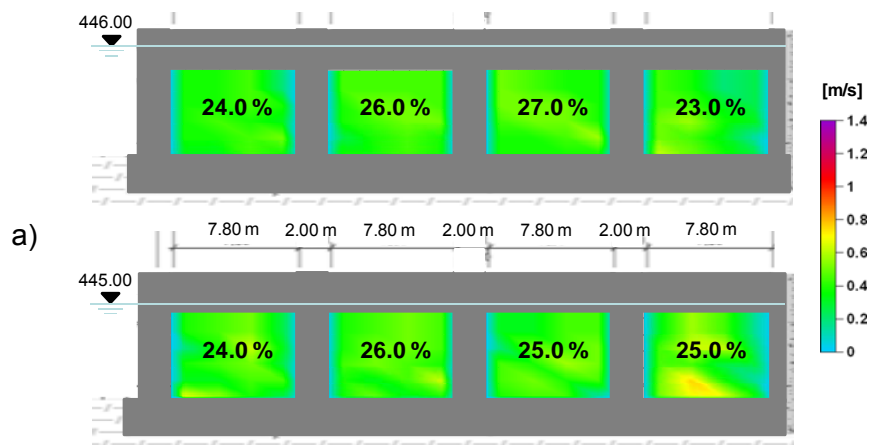


Abb. 7 Strömungsgeschwindigkeiten und Abflussverteilung am Einlauf der neuen Fassung, $Q_{\text{Rhône}} = 235 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{neue Fassung}} = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{bestehende Fassung}} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$, Pegel 446 m ü.M. (a) und 445 m ü.M. (b)

Die bestehende Fassung wird bei hohem Wasserstand von den neuen Bauwerken nicht negativ beeinflusst (Abb. 8). Die beiden Einlauffrompeten weisen denselben Abfluss auf, die Eintrittsgeschwindigkeiten liegen bei 0.8 m/s . Bei Stauspiegel 445 m ü.M. wird die unterwasserseitige Trompette geringfügig stärker angeströmt und die maximalen Geschwindigkeiten von 1.0 m/s liegen im oberen Drittel der Eintrittsöffnungen. Diese oberflächliche Anströmung wurde bereits im Ist-Zustand der Anlage festgestellt und wird durch den Ausbau der Leitmauer leicht verstärkt.

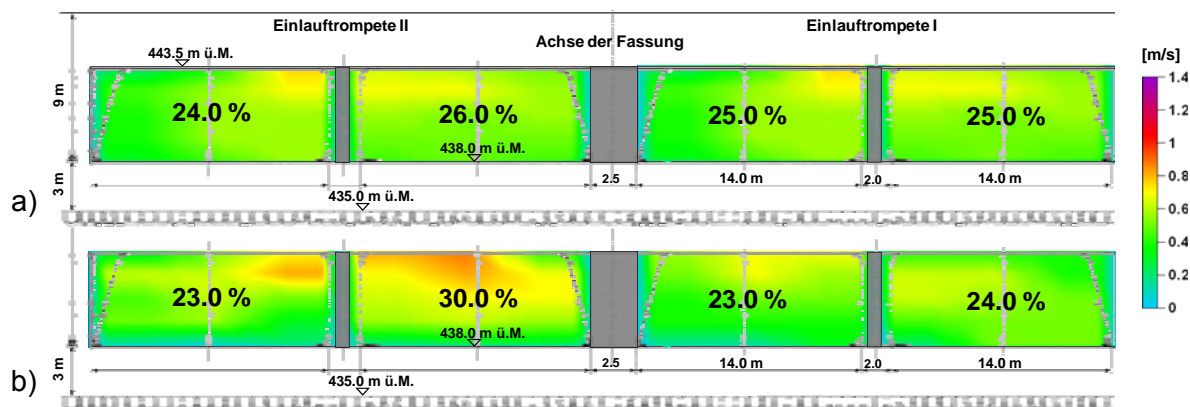


Abb. 8 Strömungsgeschwindigkeiten und Abflussverteilung am Einlauf der bestehenden Fassung, $Q_{\text{Rhône}} = 235 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{neue Fassung}} = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{bestehende Fassung}} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$, Pegel 446 m ü.M. (a) und 445 m ü.M. (b)

4.2.2 Hochwasserentlastungskapazität

Die Kapazität der Ausbauvariante bei Hochwasser entspricht den gesetzlichen Vorgaben. Dabei kann zum einen das Extremereignis von $1915 \text{ m}^3/\text{s}$ durch die Wehranlage abgeführt werden, ohne Überflutungen oberwasserseitig zu verursachen. Die erweiterte Anlage kann ein 1000-jährliches Hochwasser unter Einhaltung des (n-1)-Kriteriums abführen. Das bedeutet, dass der Abfluss von $1270 \text{ m}^3/\text{s}$ durch nur zwei betriebsfähige Wehrfelder schadlos entlastet werden kann. Wie im heutigen Zustand ist bei drei geöffneten Wehrfeldern das mittlere mit rund 40 % des Gesamtabflusses das effizienteste.

4.2.3 Sedimentbewirtschaftung

Durch die Verengung und die Verlängerung der Leitmauer entsteht auf der linken Flussseite eine effiziente Spülrinne, welche die Geschiebeablagerungen im Staubecken positiv beeinflusst. Durch die erhöhten Fließgeschwindigkeiten werden die Sedimente kontinuierlich in Richtung Wehr transportiert. Sie werden näher am Wehr und gleichmässiger auf die gesamte Breite des Gerinnes abgelagert (Abb. 10). Die Auflandungen können somit beim Spülen schnell mobilisiert und zu einem grossen Teil ausgetragen werden. Die Wirkung des Spülvorgangs nimmt mit steigendem Abfluss zu, wobei 60 bis 70 % des gesamten Sedimentaustrags in den ersten sechs Stunden erfolgt (Abb. 9a).

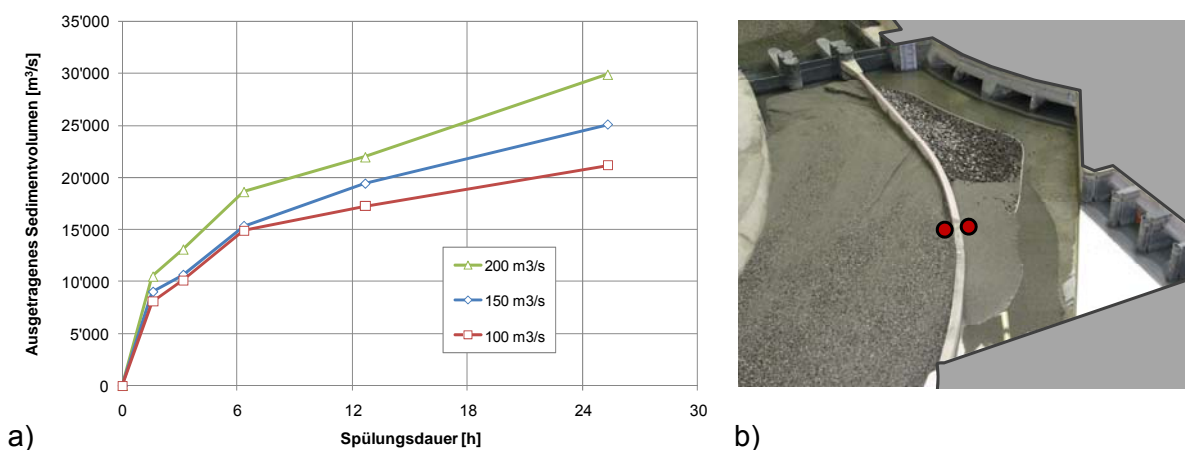


Abb. 9 Wirkung des Spülvorgangs für verschiedene Abflüsse (a), Auflandungen im physikalischen Modell und vorgeschlagene Messpunkte der Sohlenhöhe (b)

Der Bereich vor den Fassungen wird durch die Leitmauer mehrheitlich vor Sedimenteintrag geschützt. Die Sedimente, die in Suspension oder bei grossen linksufrigen Ablagerungen trotzdem durch die Anströmlücke auf die rechte Flussseite gelangen, können durch eine Spülrinne mit einem Abfluss ab $150 \text{ m}^3/\text{s}$ effizient ausgetragen werden. Zur Auslösung der Spülvorgänge wird deshalb eine kontinuierliche Messung der Sohlenhöhen am unteren Ende der Anströmlücke beidseitig der Leitmauer vorgeschlagen (Abb. 9b).

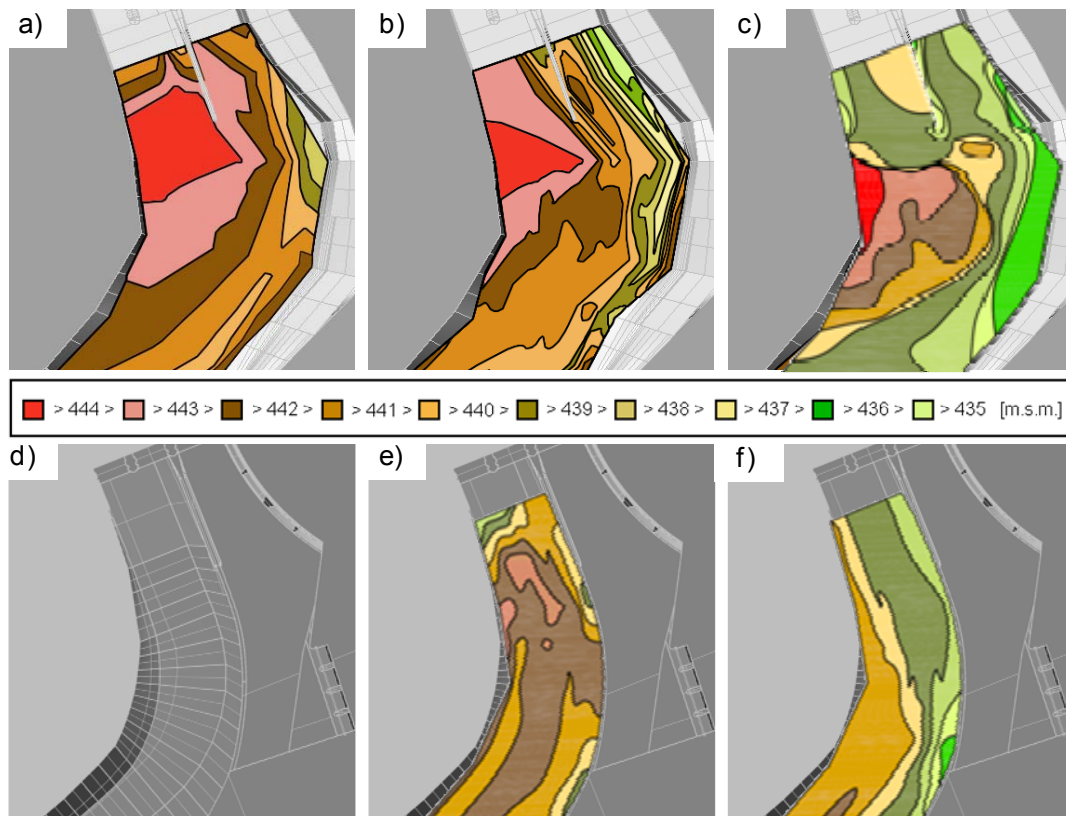


Abb. 10 Ablagerungen im Stauraum [m ü.M.]: gemessen im Prototyp vor dem Spülvorgang im 2005 (a), gemessen im physikalischen Modell vor (b) und nach 24 h Spülung (c), gemessen im physikalischen Modell mit Konfiguration *Lavey+* (d) vor (e) und nach 24 h Spülung (f)

5 Schlussfolgerungen

Der hybride Lösungsansatz erlaubt, die wesentlichen Fragen in jeder Etappe der Studie mit dem geeigneten Mittel anzugehen und so wirkungsvoll zur Problemlösung beizutragen. Die Wahl eines physikalischen Modells erweist sich aufgrund der komplexen Strömungsverhältnisse und der Sedimentproblematik als erforderlich und angemessen. Die numerische Modellierung trägt ihrerseits zur Vordimensionierung und zu einer effizienten Variantenstudium bei. Die Haupteigenschaften der numerisch simulierten Strömungsbilder bestätigen sich im physikalischen Modell, dessen Resultate im Bezug auf den Geschiebetrieb wiederum direkt mit den Messungen am Prototyp übereinstimmen.

So konnte eine optimale Konfiguration für den Kraftwerksausbau *Lavey+* gefunden und im Detail analysiert werden. Dadurch kann eine nachhaltige Geschiebebewirtschaftung mit reduziertem Sedimenttransport vor die Wasserfassungen und erhöhter Spüleffizienz garantiert werden. Zudem kann neben den geforderten Anströmungsbedingungen im Normalbetrieb auch den Sicherheitskriterien bei Hochwasser entsprochen werden.

Verdankungen

Die Autoren danken dem Auftraggeber der Studie, dem *Service de l'électricité (SEL)* der Stadt Lausanne, sowie der Ingenieurgemeinschaft *Stucky SA*, *Hydrocosmos SA* und *Bonnard & Gardel SA* für die fruchtbare Zusammenarbeit.

Literatur

- [01] Bieri M, Jenzer J, Kantoush SA und Boillat J-L: „Large Scale Particle Image Velocimetry Applications for Complex Free Surface Flows in River and Dam Engineering“. 33rd IAHR Congress, Vancouver, Kanada, 2009
- [02] Bieri M, Müller M, Ribeiro Martins J und Boillat J-L: „Complémentarité de la modélisation physique et numérique à l'exemple d'un aménagement hydroélectrique“. SimHydro 2010: „Hydraulic modeling and uncertainty“, Sophia Antipolis, Nizza, Frankreich, 2010
- [03] Groupement Stucky-Hydrocosmos-BG: „Etude hydraulique bidimensionnelle du Rhône au voisinage du barrage de Lavey“. Interne Berichte, 2005 und 2007
- [04] Kantoush SA, Bollaert E und Schleiss AJ: „Experimental and numerical modeling of sedimentation in a rectangular shallow basin“. International Journal Sediment Research, Heft 23, S. 112 – 132, 2008
- [05] Kantoush SA, De Cesare G, Boillat J-L und Schleiss AJ: „Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modeling“. Flow Measurement and Instrumentation, Heft 19, S. 139 – 144, 2008
- [06] Müller M, Bieri M, Ribeiro Martins J, Boillat J-L und Schleiss AJ: „Barrage de Lavey – Etudes physique et numérique des écoulements et du transport solide dans le Rhône“. Colloque SHF: „Modèles physiques hydrauliques“, Lyon, Frankreich, 2009
- [07] Ribeiro Martins J: „Physical and 3D numerical modeling of the water intakes of the Lavey hydroelectric power plant under steady flow conditions“. MAS master thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009

Anschrift der Verfasser

Dr. Jean-Louis Boillat, Martin Bieri, Michael Müller, Prof. Dr. Anton Schleiss
 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire de Constructions Hydrauliques
 EPFL – ENAC – IIC – LCH, Station 18
 CH-1015 Lausanne, Schweiz
 jean-louis.boillat@epfl.ch, martin.bieri@epfl.ch, michael.mueller@epfl.ch,
 anton.schleiss@epfl.ch